



高張力鋼の溶接低温割れと破面形態

荒 木 孝 雄*

従来の高張力鋼の開発は構造物の大型化および軽量化のために主として微細な組織を得て、高張力化を計かるとともに強靱な鋼を製造することに焦点が絞られてきたが、これらの開発鋼板の多くは溶接構造物では溶接法の高効率化および省力化などの進歩によるが、本来の高張力化および強靱化がそこなわれることが多々ある。そのため近年ではさらに良好な溶接性を具備することが要求され、「開発鋼の溶接性が悪ければ鋼に非ず」とまで極言する製鋼会社首脳もいるほどである。このように新しい認識に立って、溶接は各種工業分野において重要な使命をさらに負うようになってきた。

溶接性は単に溶接法および施工法のしやすさを表わす場合もあるが、全般的に、溶接継手部の溶接割れ、硬化および靱性などの性質、溶接変形と残留応力および使用環境下での諸性質を示す場合とがある。

筆者は鋼および鋼溶接部の水素に起因する割れの発生機構の解明、防止法およびその割れの生じない鋼の開発を目的として研究を行っているが、その一環として、現在、前述の溶接性のうち大きな問題の一つである溶接低温割れおよび層状割れ(ラメラティア, Lamellar tearing)の研究を行っている。ここでは水素に起因する割れとそれらの破面形態の特徴を述べる。

一般に鉄鋼材料はその製造過程および加工過程からも、また使用中の環境から、さらに自然環境からも水素の侵入を受けやすい。水素脆化はこの水素侵入により伸び、延性が低下する現象としてよく知られており、また、この水素は材料中を拡散し、集合して、応力の作用の下である時間経過後に材料の破壊をひきおこす。遅れの時間は水素の拡散と集合に必要な時間であ

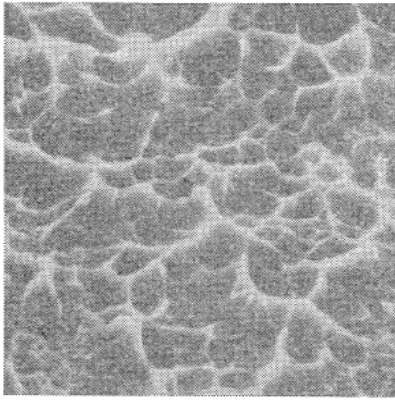
る。これが水素に起因する割れで一般には遅れ破壊と呼ばれている。

一方、溶接構造では溶接低温割れとラメラティアがあり、それらは現象的に遅れ割れの範疇に属する。溶接低温割れは溶接終了後、室温付近に冷却した後にある時間経過して溶接継手部に生じる。ラメラティアは溶接構造物の大型化に伴い、厚板の使用が増え、脚長の大きなT型溶接継手および十字型溶接継手などにて板厚方向に応力がかかると、圧延方向のラミネーションに沿って階段状(terrace and wall)に割れが生じる。この種の割れは一度発生すると溶接熱影響部のみならず母材部まで至り、場合によっては溶接部全線に亘って生じることもある。また構造上、その部材の取り替えまたは補修が困難であり重大な問題となっている。

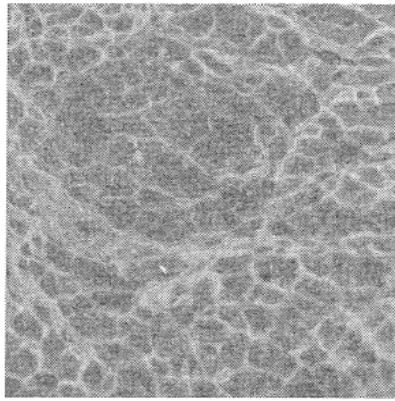
この種の割れの原因は溶接時に大気中の湿気および溶接棒被覆剤の結晶水、水分の解離により溶接金属内に浸入した水素に起因する。後者のラメラティアは水素の浸入もさることながら、さらに圧延方向に伸長された 10μ 以上の扁平な非金属介在物(とくにMnS系介在物)の集合体およびS含有量と密接な関係があり、0.010% S以上の場合に顕著に認められる。この場合、軟鋼および $50\text{kg}/\text{mm}^2$ 級高張力鋼においても生じる。また、使用環境下にて腐食反応とともに生じた水素浸入により割れが生じる場合がある。油井および石油精製装置内の硫化水素を含む湿潤環境ではラメラティアと同様、圧延面に平行に存在する非金属介在物の集合体に沿って割れが発生する。

これらの割れの詳細な機構は定荷重遅れ破壊試験、インプラント(Implant)溶接低温割れ試験およびインプラント・ラメラティア試験を基にして、検討を行っているが、その機構解明の一手段としておよび事故破面解析の基礎的

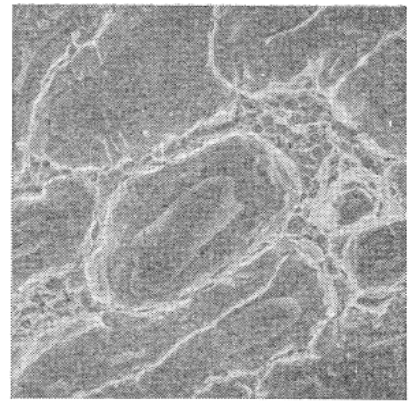
* 荒木孝雄 (Takao ARAKI), 大阪大学工学部, 溶接工学科, 助教授, 工学博士, 溶接材料学



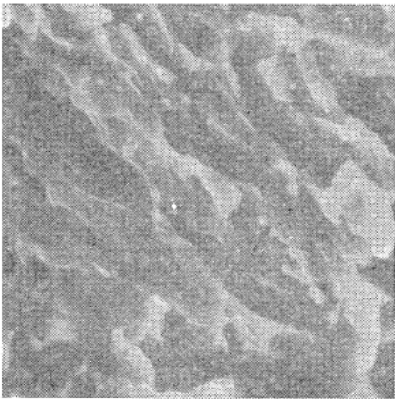
a) Ductile fracture
with dimple pattern
(hydrogen free)



b) Dimple pattern
Weld cold cracking
(delayed cracking; higher
stress level) and/or
higher strain rate and
lower hydrogen level cracking



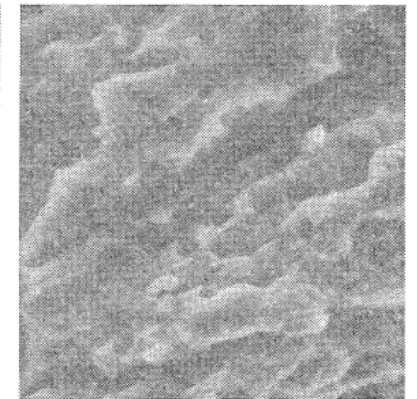
c) Dimple with
inclusion (MnS)
Lamellar tearing
(terrace)



d) Q. C. _{HE}
(Martensite)

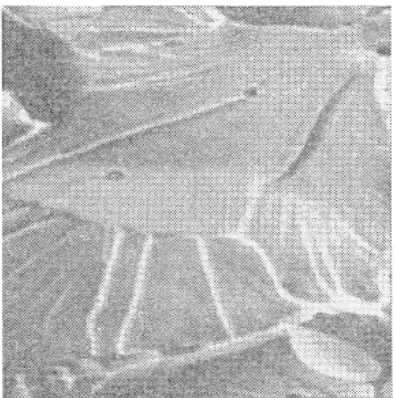


e) Q. C. _{HE}
(Upper bainite)

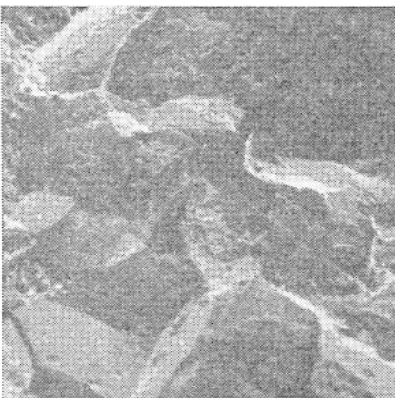


f) Q. C. _{HE}
(Bainitic ferrite)

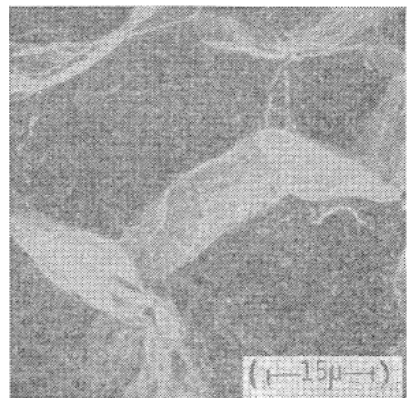
Hydrogen embrittlement (weld cold cracking)



g) C. F.
(hydrogen free)
Brittle fracture
with river pattern



h) I. G.
Weld cold cracking
(lower stress level)
and/or lower strain rate
and higher hydrogen level
cracking



i) I. G.
(hydrogen free)
Temper embrittlement
and SR cracking

The observed fracture modes in this study (|—5μ—|)

資料に資するために、得られた試片破断面は S. E. M などにて詳細に調べ、併せて水素を含まない場合の破面と比較し、典型的な破面写真を整理した。

水素を含まない延性破面は a) に示すごとく通常よく認められるディンプル(dimple)模様である。水素を含む延性的破面は b) および c) のごとくである。b) は高応力負荷での溶接低温割れ(遅れ破壊), 低水素含有材の破面および高歪速度での破面を示す。このディンプルの大きさは水素を含まない場合のそれに比して若干小さいようである。c) は高および中応力負荷した場合のラメラティアのテラス(terrace)部の破面に認められる。ウォール(wall)部は剪断ディンプルである。S 量が 0.004% 程度に低く、介在物が 5 μ 程度以下の球状の場合は階段状の割れは示さず、ラメラティアは生じない。なお S 量が多いと水素を含まなくても階段状の割れが生じる。したがって、S 量の低減、希土類元素の添加による介在物の微細化、球状化はラメラティアの防止法である。施工面では板厚方向の応力を緩和させるためのバタリング、水素量低減のための低水素棒の使用、予熱および後熱を採用する方法も防止対策である。

d) e) および f) は筆者らが特に水素脆化擬へき開破面(quasi-cleavage fracture, Q.C. HE) と称し、その特徴はいずれの組織の場合もラス(lath)間に二次割れを伴ない、破面は(110)面である。他の擬へき開破面は、例えば大入熱溶接時のポンド脆化破面にしばしば認められ、塑性結合域(tear ridge)の多い擬へき開破面であるが、二次割れは認められない。水素脆化擬へき開破面は溶接低温割れが生

じる応力範囲の中位の負荷応力以下で認められ、同様に中位の応力レベルでのラメラティアのウォール部に生じる。これらはまた g) に示す水素を含まない低温脆性破面すなわちリバー・パターン(river pattern)を示すへき開破面(cleavage fracture)とは明らかに異なる。

h) は粒界破面(intergranular fracture)を示し、下部限界応力近傍の低応力下での溶接低温割れの場合、歪速度が遅い場合および水素含有量が多い場合に認められる。通常の粒界破面は i) に示すが S. R 割れおよび焼戻し脆化などで水素を含まなくても生じ、水素が破壊に関与しているかいないかは破面からは区別できない。ただ、水素が関与する粒界破面は他に比して若干粒界破断が不明瞭な部分が認められる。また、板厚方向に低い応力が作用した場合、粒界破面および前述の水素脆化擬へき開破面を呈し、高応力負荷の場合のごとき階段状および介在物に沿った破壊は認められない。したがって、この場合、板厚方向に垂直に割れが認められても、ラメラティアと定義しがたく、溶接低温割れと考えられる。

本稿の破面は実験室的に水素にのみに起因するものを提示したが、その結果、水素に起因する破面形態は一定の負荷応力レベル、歪速度などの負荷または変形状態および含有水素量により変化する。これらは水素を含まない場合の種々の破面形態と異なる。したがって、本結果は現実の事故破面解析に対して、水素に関連するかいないかの判定などの基礎的資料に資するものと思われる。おわりに、本稿では触れなかったが水素に起因する割れの機構は現在かなり進展しており、他日を期したい。